２．人間共存・協調ロボットの安全性標準化に関する検討

2.1　概要

近年、産業用分野のみならず、非産業分野においても、公共の場や家庭内などで使用される移動ロボットの実用化が進んでおり、人間と共存する移動ロボットというものが現実のものとなってきており、今後、このようなロボットが急速に普及することが予想される。

しかしながら、現在のところ、このような人間共存・協調ロボットに関する安全対策や規格などは整備されておらず、ISO や JIS、労働安全衛生規則等ではこのようなロボットについては適用範囲外としている。

このようなロボットの安全対策は、非定常時のみに人が接近する従来の固定式の産業用ロボットとは明らかに異なり、現行の産業用ロボットに関する安全規格類をそのまま適用しようとしても無理があるなど、これまでの安全対策では、当然不十分である。

このような状況において、すでに実用化されている人間共存・協調ロボットの安全性確保及び今後の普及促進のために、人間共存・協調ロボットの安全基準の策定は急務であるといえる。

そこで、本調査研究では、これまでになされてきた機械に関する安全規格及び産業用ロボットの安全規格の人間共存・協調ロボットのへ適用についての検討に基づき、安全基準案の策定に向けた検討を開始した。

３カ年計画の最終年度である今年度は、人間共存・協調ロボットの安全基準策定のために、次のような検討を実施した。それらの詳細については、2.3 以降に具体的に述べることとする。

- 対象とするロボットの範囲を「宇宙・水中など特殊な環境を除き、人と動作空間を共有する範囲で用いられるものとする（ただし、体内などの非現実的なものは除く）。」とした。
- 規定内容については、安全性の概念、基本用件、共通の考え方、共通の技術などについてまとめることとし、安全性確保と安全設計の概念、安全性要求事項、使用上の情報の提供などの規定項目をまとめた。
- リスクアセスメントにおける人間共存・協調ロボット特有の指標、安全防護に関する具体的手段・要件等、使用上の情報提供の内容について検討を行ったが、規定項目の内容の全てについては今後も更に検討が必要である。

2.2　ワーキンググループでの審議経過

今年度は、移動ロボット安全性検討ワーキンググループにおいて５回の審議を行った。

第１回目は、今年度の進め方の検討及び人間共存・協調ロボットの安全基準で対象とするロボットの範囲について審議を行った。

第２回目は、人間共存・協調ロボットの安全基準で対象とするロボットの範囲及び規定

項目について検討を行った。
　第３回目は、人間共存・協調ロボットの安全基準で対象とするロボットの範囲を決めると共に、規定項目の定義の内容等について検討を行った。
　第４回目は、人間共存・協調ロボットの安全基準の規定項目（安全性確保と安全設計の概念、安全性要求事項）について検討を行った。
　第５回目は、人間共存・協調ロボットの安全基準の規定項目（使用上の情報提供）及び安全性確保と安全設計の概念、安全性要求事項の規定内容について検討を行った。また、報告書の内容についても検討を行った。

2.3　人間共存・協調ロボットの安全性の考え方

　固定式の産業用ロボットが人間と近接するのは，教示等の特別な場合であり，このような作業の際は事故防止のために多くの対策や安全要求事項が規定されている。しかし，移動や時には人間との接触を特徴とするサービスロボットにこれらを厳格に適用しようとすれば，移動や接触機能自体を阻害することになりかねない。このような人間との共存・協調を指向するロボットは，従来の産業用ロボットとは異なり，ロボットを人間から隔離することは不可能である。そのため，例えば人間との安全な接触が求められるが，それが安全要件として定めている基準や規格はなく、現実には適用事例は極めて限定されている。
　現在の機械の国際基本安全規格類の考え方を踏襲すると，対象機械に個別対応する安全規格がなくとも，リスクアセスメントに基づくリスク低減プロセス（安全設計手順）が適用されねばならない。機械設計の一般原則規格 ISO 12100-1（JIS B 9700-1）によれば，設計者がリスク低減プロセスを行ってもなお残るリスクを使用者へ通知することでプロセスは終了する。ただし，本来は，使用者にとって受容可能なリスクレベル以下になるまでstate-of-the-art(その時代の最高技術)の安全方策を適用しなければならない。つまり，そこまで周到な準備を実施した上で，結果として起こる事故は受容するという前提があり，決して事故の責任を曖昧にしようとするのではなく，安全の責任を果たすための共通の方法を社会的に認めるという考えがある。
　サービスロボットが自由に移動できる場合には，人間とロボットが接近・接触する状況は必ず考慮しなければならない。どんなに対策を講じても，柵の中の産業用ロボットと同等の安全保証は不可能であり，これらのロボットを動作させる以上，残存するリスクに対して，サービスを享受するロボット利用者が受容できるか改めて検討が必要である。その上で，合理的な安全設計の手順を実施しなければならない。
　そこで，リスクに基づく国際安全規格の原則を踏襲して，従来の産業用ロボットに対する規格類をサービスロボットに拡張した安全要件を提案する。

2.3.1　安全要件の骨子

サービスロボットのための安全関連要求事項は，あくまでもロボットの設計者，製造者（改造等を含む），及び安全防護装置の設計者，製造者（インテグレータ）を対象とする。ただし、グルーバルな安全の考え方に従って、社会的な残留リスクの受容を設計・製造者側が獲得するためには、事後の責任を果たすことが求められる。これは、state-of-the-artの安全方策を適用しても（事前安全責任）防げない事故、設計によって回避できない危険源に起因する事故に対して、保険等の補償を求めることであるが、本安全要件ではそこまで言及しない。

サービスロボットの設計段階において重要な点は以下の通りである。

(1) 安全設計は，包括的なリスクアセスメント，安全防護方法の選択，リスク低減効果の確認を行うことによって完成する。

(2) リスク低減方法の実施にはその内容によって優先順位があり, 本質安全化による危険源（あるいはリスク）低減，安全防護装置・付加的防護手段によるリスク低減、使用上の情報提供という3段階（3ステップメソッド）でリスク低減を実施する。

(3) リスクの見積もりの際, 基本的なリスク要素に加えて, 見積もられる危険度レベルに対する重み付けの要素を考慮する。これにより，必要とされる安全防護手段の安全性能の緩和が可能となる。

(4) 安全防護手段の安全性能は分類され，査定された危険度レベルに対応した性能カテゴリーから選択される。特に，制御システムの安全関連部の安全性能については，耐故障特性によって規定される。

(5) 安全防護機能については，接触安全及び衝突安全確保についても考慮され，これらの機能の性能によって適用順位が規定される。

2.3.2　サービスロボットのためのリスクアセスメント

サービスロボットの安全設計はリスクアセスメントから始まる。一般の機械設備と同様に、リスクアセスメントの実施手順は,

a.　使用環境（条件）の整備,

b.　危険源の同定,

c.　リスクの見積もり,

d.　リスクの評価,

と規定されており, 本来, 独立したリスクアセッサによって実行されるものである。特に, 対象機械とその仕事に対する危険源を抽出，同定する作業の確度と緻密さが，以降の危険度レベル，安全防護手段の選定に影響するため，危険源の同定は安全設計の要とも言える極めて重要な作業である。リスク分析については，様々な手法が提案されているが，基本的には人間が危険源から被る（と予測される）危害の酷さとその危害の発生確率の組み合

表 2.3.1　リスク要素とランクの基準例

リスク要素	ﾗﾝｸ	ランクの内容例
傷害の程度	C1	軽傷（打撲など）
	C2	重傷（後遺症が残る，死亡）
危険源に暴露される頻度	F1	ほとんどない（1回/日未満）
	F2	頻繁～常時（1回/時間以上）
危険事象の回避可能性	P1	可能（安全運転速度未満）
	P2	不可能（安全運転速度以上）

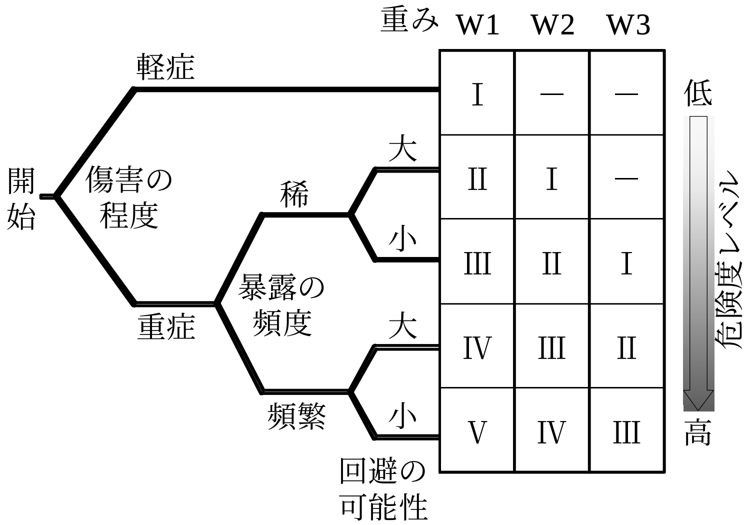


図 2.3.1 重み付け要素を付加したリスクグラフと危険度レベルの決定

わせによってリスクの大きさは表現される。そして，危害の発生確率は，人間が危険源に暴露される頻度（あるいは時間），危険事象の発生確率，人間が危険事象から回避できる可能性の3つの要素の関数となる。

表2.3.1は，リスクの見積もりのために，3つのリスク要素について簡単に2つのランク付けをした例であり，各々のランクの組み合わせによって危険事象の発生確率に依存しないリスクの大きさが推定できる。ただし，想定される傷害が軽傷（C1）の場合は，他の2つの要素のランクにかかわらずリスクは低いものとしている。また，危険事象の発生確率は，後述する安全防護手段の選定結果に関連して考慮される。

リスクの評価は，例えば図2.3.1に示すようなリスクグラフの形で記述して，5通りの査定結果として危険度レベルⅠ（低リスク）～Ⅴ（高リスク）が得られる。なお，W1～W3

は前述の重み付け要素であり，例えば，利用者が対象ロボットに関与する度合い，利用者がロボット機能を熟知している度合いによって，あるいは，救護ロボットのようにリスクを負っても対象ロボットを使用する必要がある場合は，危険度レベルを緩和する側（すなわち W2，W3）に設定することができる。

サービスロボットについては，標準のリスク査定（W1）によって動作自体が高リスクとされ，ロボット本来の機能を喪失することになる場合に，危険度レベルの緩和が考慮されるものとする。緩和の根拠は，手術ロボットのように，患者がリスクがあってもロボットによる効果を求めるため契約（インフォームド・コンセント）できる場合を除いて，社会的に対象ロボットのリスクベネフィットが認識されることが求められる。このような判断は，最終的にはリスクアセッサに委ねられる。しかし，リスクベネフィットが予測される使用環境（使用者を含む）で確立されないと判断される場合は，使用環境の限定（例えば，使用場所の限定，免許制による使用者の限定）などを考慮する必要がある。

2.3.3　リスクアセスメントに基づくリスク低減

リスク評価の結果，危険度レベルが決定すると，それに対応する安全性能を持つ安全防護手段が選定されねばならない。安全性能カテゴリーは，高カテゴリー（高安全性能）であるほど故障に対する安全機能確保の確実性が要求される。すなわち，対象ロボットに装備される安全防護手段の安全性能が高いほど，危険状態から危険事象への遷移を阻止することが可能となり，結果として危険事象の発生確率は低下することになる。なお，危険度レベルと安全性能カテゴリーとの対応は，最高危険度レベル以外は安全防護装置の技術的内容によって選択の幅を持たせている。

表 2.3.2　安全性能に対応するリスク低減手段の選定

<table>
<tr><th>危険度レベル</th><th>安全性能カテゴリー</th><th colspan="5">安全防護手段
（高　←実施の優先度→　低）</th></tr>
<tr><td rowspan="2">V</td><td rowspan="2">4</td><td rowspan="10">本質安全設計</td><td colspan="3" rowspan="7">インタロック装置
トリップ装置
人存在検知設備</td><td rowspan="10">個人防護具</td></tr>
<tr></tr>
<tr><td rowspan="2">IV</td><td rowspan="3">3</td></tr>
<tr></tr>
<tr><td rowspan="2">III</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">II</td></tr>
<tr><td rowspan="3">1</td><td rowspan="3">ガード</td><td rowspan="3">注意喚起手段</td><td rowspan="3">手順書訓練</td></tr>
<tr><td rowspan="2">I</td></tr>
<tr></tr>
</table>

表2.3.2は，様々な安全防護手段を安全性能カテゴリーにより分類したものである。この安全性能カテゴリーはISO 13849-1（JIS B 9705-1）で規定されるものであり，カテゴリー1は信頼性向上，カテゴリー2以上は制御構造により，定期的な診断，多重化，常時監視の順に高リスク対応の高安全性能を有する。ここでは，ガード等の機械的手段は，本質的に危険源を除去できる場合を除き，単独では安全性能は低く見積もられ，電気・電子あるいは油空圧の装置と組み合わされて高安全性能を発揮できるとしている。同様に，注意喚起手段，手順書や訓練も単独では安全性能の低い補助的手段であり，個人防護具は安全性能に関係しない。本質安全設計も安全性能に関与しないが，リスク自体が生じないことを目的としているため，優先的に採られる手段である。

現在，産業用ロボットで使用されている安全防護手段の代表例について，安全性能を分類すると表2.3.3に示すようになる。安全機能が高度になるほど高リスクレベル対応となっていることが分かるが，市販のセンサ類でカテゴリー対応を謳っている製品は多くは

表 2.3.3　主要安全防護手段の適用リスクレベル

手　段		安 全 機 能	適用リスクレベル Ⅰ　Ⅱ　Ⅲ　Ⅳ　Ⅴ
インタロック	ポジションスイッチ	二重化接点回路	
	ドアスイッチ（スライド式、ヒンジ式）	同上、加えて、強制開離機構、ポジティブな機械結合	
	電磁ロック付ドアスイッチ	同上、加えて、バネ施錠/動力解錠	
	近接スイッチ	二重化接点回路、異種冗長化/コード化	
トリップ装置	ライトカーテン・光ビームセンサ	二重化接点回路、周期的な自己診断（タイプ2）	
		独立二重化/相互常時監視（タイプ4）	
	レーザエリアセンサ	二重化接点回路、スキャン毎自己診断（タイプ3）	
	マットスイッチ	4線式+断線検知付き制御器	
制御回路	保護インタロック回路	二重化接点回路、自己保持回路	
		同上、加えて、接点溶着検知	
		同上、加えて、遅延回路	
	停止回路（ハードワイヤ）	制御上の停止（停止カテゴリ2）	
		制御停止後に駆動源遮断（停止カテゴリ1）	
		制御されない駆動源遮断（停止カテゴリ0）	
補足	非常停止装置	二重化接点回路、強制開離機構、停止保持	

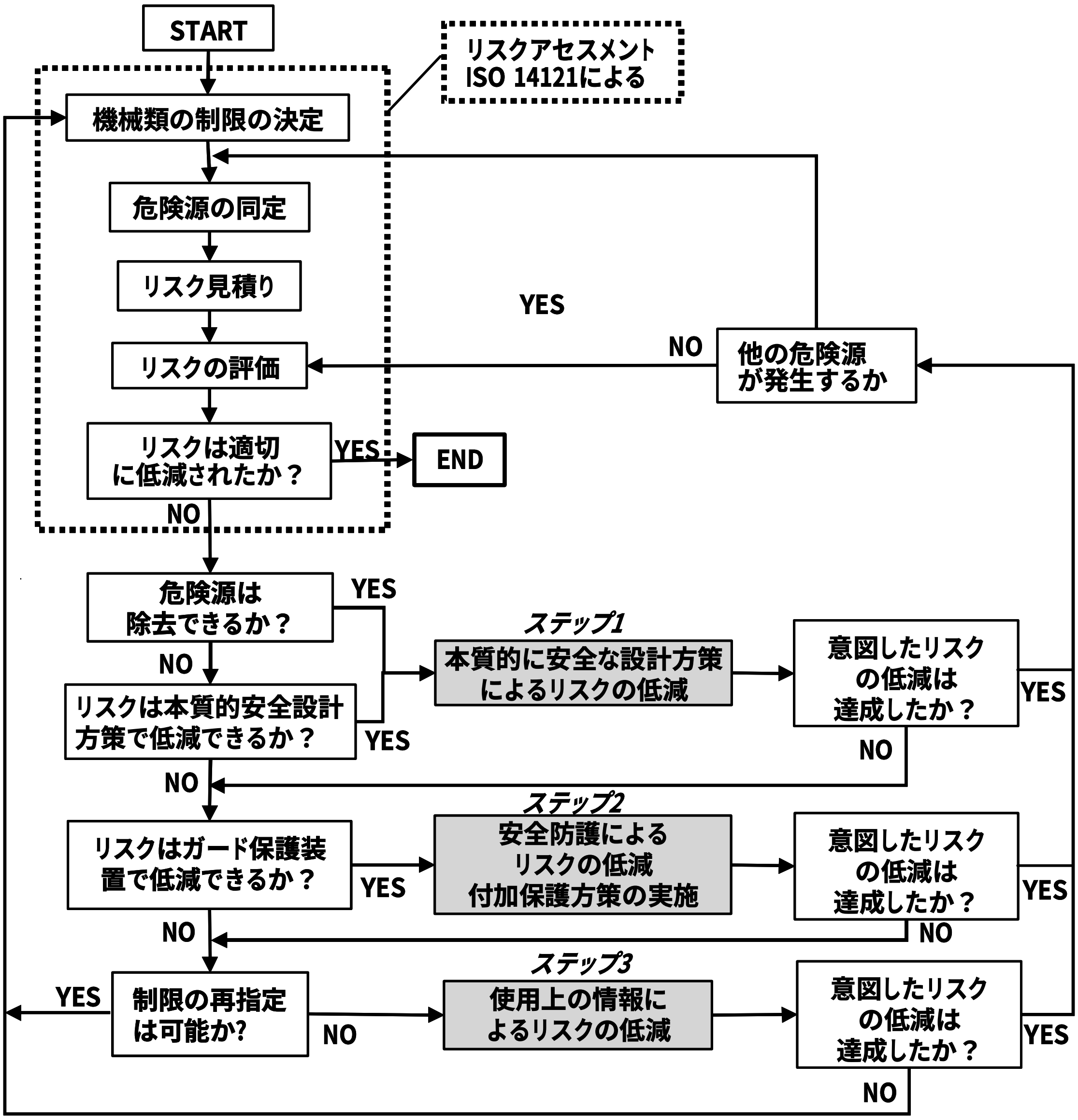


図 2.3.2 リスクアセスメントに基づく 3 ステップメソッドの手順

ないのが現状である。サービスロボットに適用可能なセンサ類となるとかなり限定されてしまうため，低カテゴリー製品の組み合わせや後述する階層防護を取り入れて，システムとしての安全防護を検討する必要がある。また，センサメーカの安全制御への対応を更に促進することが望まれる。

なお，これらの安全防護手段の実施の優先順は，同表に示すように本質安全設計から始まり，次いでインタロック等の安全防護が施されねばならない。このことは，図2.3.2に示すように，機械安全基本規格で3ステップメソッドと呼ばれる基本ルールである。

さて，実際の重み付けされたリスクグラフを用いるリスク低減の手順は，次の順序で行

われる。

1) W1の危険度レベル判定に対応する安全性能カテゴリーを選定する。(通常選定)
2) 通常選定が不可能な場合，低安全性能カテゴリーの組み合わせを適用して，再度危険度レベルを検討する。
3) 低安全性能カテゴリーの組み合わせ適用が不可能な場合，W2，W3による危険度レベルの緩和を行う。

この操作によって, サービスロボットがあくまでもリスクを認めるシステムである限り, 人間依存の安全方策や最高の安全性能ではない安全方策も積極的に活用することができる。移動ロボット導入により大きな危険性が改善される反面，それにより生じる小さな危険性は許容しようということである。

なお, リスクアセスメントは許容レベルまでリスクが低減されて終了する。前述の通り, 手術用ロボット使用者と受益者が特定されるような場合を除いて，リスクを受容する不特定多数の使用者に代わって，どの危険度レベルが受容レベルかを示すことは難しい。現実的には，ロボットの設計者・製造者が上述のリスクアセスメントに基づくリスク低減を可能な限り実施し，製造者による安全確保の限界を宣言して，残留リスクに関する情報を使用者へ漏れなく提供することによって，使用者側でできるリスク低減活動に寄与することが最善と考えられる。

2.3.4　リスク低減手段の防護階層

リスクアセスメントの実施において，留意しなければならないことは，最悪の条件でリスクを見積もることである。安全防護手段に要求される安全性能がこの段階での評価に依存するため，より厳しい側に査定することが求められる。また，個々の危険源毎に安全防護手段を検討しなければならない。

しかし，安全防護手段がリスクを低減する効果は，対象とする危険事象の発生確率のみに関係するのではなく，他のリスク要素のランクを低減することも多い。例えば，サービスロボット移動機構部と使用者との追突については，追突以前に早期回避すれば暴露頻度は減って危険状態は生成せず，低速度になっていれば怪我をしても軽傷で済み，利用者は回避し易くなって危険事象に至ることは減る。すなわち，安全防護手段によるリスク低減は, 危険源が危険事象に拡大してゆくプロセスの各段階で効果を上げることが可能であり, 複数の安全防護手段を階層的に機能させることが有効である。

このような複数の方策を適切に組み合わせて利用する方法についてはロボット関連分野では十分検討されていない。そこで，化学プロセス分野で提唱されている独立防護階層（Independent Protection Layers，以下 IPL）の概念を導入して，ロボット防護手段の階層化を図ることとした。IPL による設計思想は，対象危険源が危険事象として発現して拡大する時間順にリスク低減方策を階層配置し, より早期の防護層から独立して機能させて,

システム全体としてリスク低減を図るものである。また，各階層の効果を独立に評価できるため，総合的システムの評価が容易となる。

IPL で定義される階層は，以下のものである。

・第1層：本質安全設計（危険源除去）
・第2層：基本プロセス制御（通常運転の維持）
・第3層：運転員の介入/重要警報（人間の修正）
・第4層：インタロック（自動緊急停止）
・第5層：物理的防護手段（リリーフ弁）
・第6層：物理的防護手段（防液提）
・第7層：プラント内緊急対応計画（事業所内）
・第8層：地域防災計画（地域住民，公共施設）

一般に，機械設備においては，インタロックが重要で最終防護階層として機能しなければならないが，プラント設備においては，インタロックが失敗もしくは不可能な場合でもその後の防護層がカバーすることとしている。また，プラント機能停止による損失に対して，人間のリスク低減効果を積極的に評価していることも特徴である。このような IPL の考え方は，経済的損失を考慮するかの議論は別として，人間共存環境下で動作しなければならないようなサービスロボットに広く適用可能と思われる。

例えば、特に危険度レベルの高い移動機構部が人間に衝突する場合とマニピュレータに

表 2.3.4　サービスロボットの衝突と挟圧の危険源に対する防護階層例

階層	衝突の危険源に対する防護	挟圧の危険源に対する防護
1	軽量化 速度の制限	小型のアクチュエータ利用 挟圧部除去
2	回避性能の向上 早期障害物認識 最適経路計画	力監視と制御 人間の動作や意思の認識
3	警告（音，光，音声） 人間の回避行動の支援 手順・管理の整備	イネーブルスイッチ 人間の回避行動の支援 手順・管理の整備
4	近接センサ，接触センサ＋駆動源遮断停止	力センサ，モータ電流検出，制御偏差の診断＋駆動源遮断停止
5	摩擦ブレーキ 車輪のスリップ	トルクリミッタ
6	バンパ 防護具	防護具
7	安全教育／運動， 負傷者の救命活動	安全教育／運動， 負傷者の救命活動

より人間が挟まれる場合を例として，適用可能なリスク低減手段を前節の IPL の定義に従って分類する。表2.3.4にその結果を示すが，ここでは第8層はサービスロボットでは考慮する必要がないため含んでいない。また，第3層まではロボットの動作を維持する機能であるが，プラント設備のオペレータとは異なり，サービスロボットに関わる人間が直接危険源と対峙する状況となる場合は，その当事者による介入操作によるリスク低減効果は期待すべきではない。したがって，ロボットの動作を放棄しても安全な状態へ移行する機能の第４層以降が重要となる。なお，第5層は蓄積された運動エネルギーを外部へ放出あるいは消散する機能であり，第6層は人体への伝達エネルギーを吸収あるいは遅延させる機能である。第7層は通常の機械システムを対象とする場合，直接リスク低減には寄与しない。

また，特に第2，4層は安全制御手段となるので，各々の層における手段は前述の安全性能カテゴリーで規定されてリスク低減効果が算定される。同層中に複数の手段が機能する場合は，仮に各々の手段の安全性能カテゴリーが低くても，組み合わせによってより高いカテゴリーに対応可能と見なせる可能性がある。

以上の検討を基に，サービスロボットの安全性ガイドラインを提案する。これは，機械安全規格体系における B 規格（グループ規格）としての位置付けを想定しており，サービスロボットに共通する安全確保の考え方と手順,安全技術を網羅することを目標としたが,幅広いサービスロボットを対象としたため,具体的な安全要件に関しては検討途上である。関連規格の動向を見ながら，今後議論を深めてゆくためのたたき台として述べるものである。

2.4　人間共存・協調ロボットの安全性ガイドライン案

１．総則

適用範囲（適用除外）：清掃，警備，福祉，生活支援，アミューズメント等の多様な用途のため，産業環境または非産業環境におけるサービス事業や公共，家庭等の場で，人間と共存しつつサービスを提供するロボット（以下，サービスロボット）の設計，製造に対して適用し，サービスロボットに係わる人間の安全確保のための指針とする。サービスロボットの改造，導入，運用，保守・修理については，製造者が責任を持つ範囲についてのみ言及する。

人間が存在する空間を動作空間として持つサービスロボットを対象とし, 空中（宇宙), 海底，人体内を動作空間とするものは適用しない。なお、サービスとは、人間への物理的関与以外にも情報の提供を含む。

２．引用規格

産業用ロボット安全規格（ISO/FDIS 10218-1）

知能ロボット, 移動ロボット及びサービスロボットの用語規格（JIS B 0185, 0186, 0187）
機械（電気）安全規格類（JIS B 9700-1,2，9702，9705-1，9960-1）

３．用語の定義（安全関連のみ，引用規格にあるものは除く）

- リスクベネフィット：被るリスクに対して受ける利益，またはその逆。受益者が受益の程度に応じて受容リスクレベルを緩和するときの指標として利用する。
- クリティカルリスク：設計段階でどうしても回避できないリスク。このリスク低減の主体はロボット使用者側となる。
- ALARP 原則：合理的に実行可能な最低レベル。リスクを技術水準や環境，あるいはコスト等を考慮した上で実行可能な最低レベルまで下げること。
- 階層化防護:安全防護をリスクアセスメントの結果に基づいて最適で効果的に配置すること。多層の防護が危険事象の発現を段階的に抑制するように，安全制御システムを構築する。
- 接触安全：人体との静的接触におけるリスクが十分低いこと。ロボット可動部の動作状態に依存せず，接触点にかかる力（トルク），あるいは変位で判断される。
- 衝突安全：人体との動的衝突におけるリスクが十分低いこと。衝突点にかかるエネルギー（運動量）等で判断される。

４．安全性確保と安全設計の概念

(1)一般

ロボット設計・製造者は，リスク低減プロセスに基づきリスクアセスメントを実施して，その上で本質的安全設計，安全防護および付加保護方策，並びに残留リスクについて使用上の情報提供の 3 ステップメソッドによる危険源除去またはリスク低減方策を反復的に実施しなければならない（JIS B 9700-1 参照)。

(2)リスクアセスメントの実施

リスクアセスメントは，リスク分析，リスクの見積もり，リスクの評価を系統的に行うプロセスである（JIS B 9702 参照)。リスク分析においては，想定動作に対して全ての危険源を同定しなければならない。危険源の同定のため，留意すべきチェック項目を附属書に示す。

なお，危険源の同定においては，使用環境の想定（使用場所，利用者，要員（オペレータ，保守員)，ライフサイクル)，合理的に予見可能な誤使用，保護機器を含む制御の不具合、人間工学原則の無視などを考慮しなければならない。

次に，想定タスクと危険源の組み合わせに対して，リスクを見積もるためのリスク要素を定めて各々のリスク要素の算定と総合的なリスク評価を行う。なお，リスクの見積もりの際は最悪基準を用いることで基本であり，また、暴露頻度は暴露時間も考慮し、

回避可能性は危険事象の発生速度や要員かそれ以外の人かを考慮すべきである。

(3)リスク低減方法の決定

対象危険源のリスク要素の査定により対象タスクにおける危険度レベルを定め，対応するリスク低減カテゴリー（JIS B 9705-1 による安全性能カテゴリー１～４）と安全防護手段を選定する。選定の優先順位は，3 ステップメソッドに従って，本質的安全設計，安全防護及び付加保護方策，使用上の情報の順とし，さらに残留リスクへの対応を実施する。

a)本質的安全設計

想定危険源の低減または抑制のための必要十分な設計基準値を定め，これを満足するように本質的安全設計を実施した後，改めて危険源のリスク評価を実施しなければならない。機械的危険源に対して，主に適用可能な本質的安全設計のための構造および機能は以下の例がある。

・ 機構部の軽量化
・ 移動速度の制限
・ 駆動力の制限
・ クリアランスの確保
・ 動力機構の遮断および伝達部の分離
・ 柔軟構造または材質

b)安全防護および付加保護

本質的安全設計を実施しても十分な危険源の抑制ができず，リスクが残る場合，次の順序でリスクを除去または低減しなければならない。

・ 保護機器（安全防護）
・ 補足手段（付加保護方策）
・ 安全防護物（付加保護方策）
・ 警告表示（付加保護方策）

c)使用上の情報提供

安全防護および付加保護を実施し，再びリスク評価を行い，最後に残るリスクを使用に関する情報として作成しなければならない。特に，クリティカルリスクについては，使用者による運用（使用条件の限定を含む）のために十分な情報を提供する必要がある。

(4)リスク評価の緩和

適切なリスク低減が実施されたかを判断するためのリスク評価は，リスクアセッサの責任の下実施されるが，対象ロボットがリスクをトレードオフする要因を有する場合，見積もられた危険度レベルを緩和するための追加要素を，必要な場合にリスクアセッサが追加設定できる。次のようなトレードオフ要因が想定されるが，それらには限定されない。

・ リスクベネフィット（ロボットによる受益者との契約を含む）

・ロボットオペレータに関する重み付け（人数，作業に関与する度合い，認知度等）
・ALARP 原則
・利便性向上に関する社会的ルール・コンセンサス

ただし，リスクアセッサは作業環境や条件等によってこれらの手法の適用を検討し，その理由を提示する必要がある。

基本的なリスク低減カテゴリーの緩和決定は，次の優先順位に従って行われる。

a)追加要素なしで危険度レベル判定に対応する安全性能カテゴリーを選定する。（通常選定）

b)通常選定が不可能な場合，低安全性能カテゴリーの組み合わせを適用して，再度危険度レベルを検討する（階層化防護を含む)。

c)低安全性能カテゴリーの組み合わせ適用が不可能な場合，追加要素に基づく危険度レベルの緩和を行う。

５．安全要求事項

5.1 本質的安全設計

重要な危険源の低減または抑制のための必要十分な設計基準（目標）を策定して，設計段階でそれらを可能な限り満足させるロボットの構造，機能を変更する。ただし，サービスロボット本来の機能を喪失しない。本質的安全設計で検討すべき項目は以下の例がある。

(1) 材質：人体接触可能性のある部位の堅さ，温度，化学的性質
(2) 形状：人体接触可能性のある部位の鋭利さ，表面加工，間隙（挟まれ部）
(3) 速度：人体部位へのアプローチ速度（回避可能性，視認性），衝突速度・加速度限界
(4) パワー（力）：人体部位への加圧力限界，衝撃ピーク力・静的持続力，質量
(5) 電磁環境：人体への電磁波暴露限界
(6) その他：緩衝性など

5.2 安全防護物の設計・配置

危険源によるリスクを低減するため，安全防護物の設計・選定と据付のための要件が規定される。

(1) 主な安全防護物

主な安全防護物機能は，隔離，近接検出，接触検出，協調動作監視などがある。各々の機能の例とそれらの安全性能については，ほぼ基本安全規格体系の B 規格類を参照可能である。

・ガード・バリア：動作空間の固定が可能となる。強度，クリアランス(安全距離)等が規定される。

・ 非接触式存在検知機器：ロボットに接近する人体部位を接触前に検出する。ロボットの回避動作や速度制御，停止インタロック等に利用するため，光線(反射，透過)式，レーダー式，静電容量式，焦電式，カメラ，GPS などが利用される。リスクに応じた安全性能の選定が規定される。
・ 接触式存在検知機器：ロボットに人体部位が接触したことを検出する。ロボットの回避動作や速度・力制御，停止インタロック等に利用するため，バンパ式，エッジ式，マット式，トルク・力覚センサ，モータ電流検知などが利用される。リスクに応じた安全性能の選定が規定される。
・ 動作監視・正常性監視手段：ロボットの正常動作を監視するために，内界センサ（力覚センサ，電流センサ等），外界センサ（カメラ，レーダー等），自己診断機能（ウォッチドッグ等）が利用される。リスクに応じた安全性能の選定が規定される。

(2)安全性能カテゴリー

安全防護物（保護機器）が安全関連部の安全制御に関わる場合，危険度レベルの判定結果により JIS B 9705-1 に基づく安全性能カテゴリー（B，1～4）が規定される。

(3)複数保護機器による安全性能の補完

単一保護機器によるリスク低減が十分でない場合，複数の保護機器の組み合わせによる対象危険源の多重監視，あるいは対象危険源の領域を拡張して外側に対して追加保護機器による階層監視を行うことができる。後者は，階層化防護により危険源の危険事象への発展を段階的に抑制することができる。なお，いずれの方法も異種多重化により共通要因故障の影響を抑制可能である。

5.3 補足手段の設計・配置

安全防護物と組み合わせてリスク低減効果を得るため，補足的防護手段の設計・選定と据付のための要件が規定される。機能については，

・ 制限装置：軸制限装置やトルクリミッタ，あるいは空間動作制御等の動作能力の制限手段が利用される。リスクに応じた安全性能の選定が規定される。接触安全確保のための階層化防護により, 機械的力制限装置（トルクリミッタなど), 機械的力伝達装置（クラッチなど），機能的力制限装置（接触センサによる力制御）の順に機能する。
・ 制動装置：運動エネルギー消散手段としてブレーキが利用される。制動以外にも，位置保持のためにも利用される。衝突安全確保のための階層化防護により，機械的制動手段（機械的なブレーキ), 電気的制動手段（回生ブレーキなど), 緩衝機能の順に機能する。
・ 緊急停止装置：非常停止装置と停止制御の要件が B 規格類で規定される。特に，停止カテゴリー1（JIS B 9960-1 参照）による非常停止手段にはリスクに応じた安全性能の選定が規定される。
・ 緩衝機能：運動エネルギー伝達の制限と抑制のためのバンパ，アブソーバ，クッション

等が利用される。
・警告・警報：接近・接触等への注意を人間に喚起するためのアラーム，表示手段が利用される。

5.4 その他の要件

サービスロボットの停止に関して，位置保持のための停止状態の場合は，自重による落下等の新たな危険源の発生を考慮しなければならない。一方，人体を挟圧したままの停止状態からは，駆動源なしの動作を可能としなければならない。

６．使用上の情報の提供

リスク低減方策が実施されたサービスロボットに対して，設計・製造者は残留リスクについての情報および運用上の注意に関する情報を使用者へ提供しなければならない。

(1)設置・取扱説明書

・操作方法:駆動源供給による非常停止後の回復動作など
・警告・注意:事前注意情報
・仕様・技術的情報：使用(保管環境)，機能と仕様，安全性能，運転速度，緩衝機能など
・保証・品質:規格リスト，関連規格と関連文書
・保守:予防的保守スケジュールを含む保守情報
・システム要求事項：電気的要件，電磁妨害等の特別な環境に関する情報
・その他：残留リスク（クリティカルリスク）とその対処方法，故障モード解析情報，危険源解析と全ての危険操作に関する説明，要員役割の情報，訓練用素材など

(2)マーキング

表示，銘板には視認しやすく，かつ耐久性のある方法で，製品名称，型式，製造者情報（名称，連絡先），製造年月日など

７．安全妥当性検証と記録

設計・製造者は，安全設計仕様書，リスクアセスメント結果，安全評価体制（リスクアセッサ，認証者）等の文書化と保存に努めなければならない。

8. 付属書

参考１：本質的安全設計のための基準値の例（ただし，子供は対象外）

リスク低減のための物理量	参　考　値
挟圧力 （静的）	可動ガード：150N（保護有），75N（保護無） 産業用車両：750N 電車ドア：～600N エレベータドア：150N以下（ANSI） 自動回転ドア： 80N 以下（但し、衝撃緩和後≦ 平均150N（4.5s間））（JIS） 静止力222N（IRDA） IAD（インテリジェントアシストデバイス）： 261N（ANSI）

リスク低減のための物理量	参　考　値
衝撃力 （動的）	可動ガード：10J（保護有），4J（保護無） 自動回転ドア：≦1400N（0.5s間、クリアランス500mm） ≦700N（0.5s間、クリアランス300mm） ≦400N（0.5s間、クリアランス200mm） (JIS) 3.39J（接触前の抑制）（ANSI） 接触時10J、最終減速時0.17J(BS) ≦250N（AS）

リスク低減のための物理量	参　考　値
クリアランス	≦8mm又は≧25mm　（指の巻き込み対応）

参考２：リスクアセスメント（危険源同定）のための項目

危険源チェックリスト

1	ロボットに挟まれ、巻き込まれることはないか
2	感電の恐れはないか
3	火傷、火災、爆発に至る熱源や危険物はないか
4	騒音ストレスを生じないか
5	振動が原因で危険な状態が起こらないか
6	人に傷害を与える放射源はないか
7	ロボット素材や扱う材料は危険ではないか
8	オペレータが扱いやすい機械になっているか
9	小ハザードの組合わせが事故につながらないか
10	制御システムの不具合で危険状態を生じないか
11	ロボットが停止できないようなことはないか
12	動力源が故障して危険状態を生じないか
13	電気回路の故障で危険状態を生じないか
14	部品の取り付け間違いで危険状態を生じないか
15	運転中に部品が壊れて危険状態を生じないか
16	ロボットが危険物を放出しないか
17	ロボットが安定性を失わないか
18	人がつまずく、滑る、落下することはないか

2.5　まとめ

本年度は、人間共存・協調ロボットを対象とし、主に、サービスロボットの安全要件の検討を行った。このようなロボットが単に危険だからという理由でその実用化を妨げてはならず、合理的で正当な手続きによるリスク低減を行った後に生じる事故は受容するという前提から、新しい形態のロボットの安全設計を行う必要がある。今回は，従来の安全設計の手順を逸脱せずに拡張したリスクアセスメントと，その結果に基づく階層化安全防護の考え方と提案し，サービスロボットに適用した。

基本的には，ロボットは人間と隔離されている間は自由に振る舞えるが，人間に近づくにつれて，より高い安全性能を有する安全防護手段が機能し始めるという防護階層が形成される。適切なリスクアセスメントの実施により，防護階層の安全性能が規定されるが，安全設計指標を確立するためには，人間工学的観点からの受容リスクの判断等を検討する必要があり，さらにはより本質安全を指向する要素技術の開発が期待される。

また、今回のガイドライン案を有効とするためには、前述したように、事後安全責任の体制や社会的な認証制度等を並行して整備することが重要である。